

Dr hab. Liliana Rybarska-Rusinek, prof. PR
Zakład Modelowania Matematycznego
Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Rzeszów, 05.09.2022 r.

Szanowna Pani

Prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak

Przewodnicząca Rady Dyscypliny
Inżynieria Mechaniczna

Przesyłam w załączeniu recenzję rozprawy doktorskiej mgra inż. Olafa Popczyka pt.: "Modelling of thermal fields in metamaterials using radial basis function-based meshless methods", której promotorem jest dr hab. inż. Grzegorz Dziatkiewicz, prof. PŚ.

Z poważaniem

L. Rybarska-Rusinek

Biurowo Dziekana

wpłynęło dnia 05.09.2022.
RD JM e/1551 52/ 2022
nr zał. 2 e42.

Dr hab. Liliana Rybarska-Rusinek, prof. PRz
 Zakład Modelowania Matematycznego
 Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej
 Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
 al. Powstańców Warszawy 12
 35-959 Rzeszów
 E-mail: rybarska@prz.edu.pl

Rzeszów, 31.08.2022 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Olafa Popczyka

**pt.: “Modelling of thermal fields in metamaterials using
 radial basis function-based meshless methods”.**

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Działkiewicz, prof. PŚ

1. Uwagi ogólne

Ważną grupę współczesnych problemów inżynierskich stanowią: konstruowanie, wytwarzanie, badanie własności, optymalizacja, a następnie wykorzystanie zaawansowanych materiałów wielofunkcyjnych. Same eksperymenty fizyczne, często zbyt kosztowne lub niemożliwe do przeprowadzenia, nie są w stanie dostarczyć wystarczająco szczegółowej wiedzy na temat wieloaspektowego zachowania fizycznego materiałów silnie niejednorodnych. Zatem, zgodnie z ogólną tendencją nowoczesnej nauki, niezbędne jest rozwijanie efektywnych metod i narzędzi numerycznych, zdolnych do symulacji złożonych procesów (termicznych, mechanicznych, optycznych) zachodzących w materiałach o zróżnicowanej strukturze wewnętrznej. Dotyczy to przede wszystkim materiałów niejednorodnych, które nie powstają w sposób naturalny np. kompozyty, tworzywa gradientowe czy metamateriały. Opracowywane od około 15 lat metamateriały posiadają niezwykle własności, które zawdzięczają precyzyjnemu projektowaniu i wytwarzaniu w skali nanometrów. Umiejętność wykorzystania metamateriałów do kontroli przepływu ciepła otworzy szeroką gamę możliwych zastosowań praktycznych począwszy od tarcz termicznych (ekranowanie), kontroli emisji promieniowania w wysokich temperaturach, zbierania ciepła odpadowego, wreszcie termicznej niewidzialności (maskowanie).

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy modelowania pól termicznych w ośrodkach niejednorodnych, które charakteryzują się zmiennością przestrzenną parametrów termofizycznych. Analiza prowadzona jest w oparciu o klasyczną bezsiatkową metodę Kansa z radialnymi funkcjami bazowymi w postaci wielokwadrów (*ang. multiquadrics*). Należy podkreślić, iż praca dotyczy aktualnego podstawowego problemu naukowego: poznania, w jaki

Biurowo Dziekana

sposób wewnętrzna struktura systemu przejawia się w ogólnym zachowaniu systemu. Jest to zagadnienie istotne dla szerokiej klasy systemów różnego typu: nanostruktury, metamateriały, materiały naturalne i prefabrykowane, skały skorupy ziemskiej, konstrukcje inżynierskie, systemy biologiczne (kości i tkanki). Badanie takich systemów prowadzi na ogół do układów o dużych, często źle określonych macierzach i wymaga starannego doboru metod i ich parametrów. *Podsumowując, tematyka rozprawy, jej cel i zakres oraz zastosowane metody badawcze są w pełni uzasadnione aktualnym stanem wiedzy i potrzebami praktycznymi.*

2. Przegląd treści rozprawy

Rozprawa doktorska obejmuje łącznie 164 strony i składa się ze streszczenia, podziękowań, spisu treści, spisu rysunków, wykazu skrótów i oznaczeń, pięciu rozdziałów oraz bibliografii i dodatku. Została napisana w języku angielskim.

Rozdział 1 ma charakter wprowadzający. Doktorant w oparciu o pozycje bibliograficzne przedstawił skrótowo analizowany problem, zalety i ograniczenia oraz kluczowe parametry metody Kansy, której warianty zostały wykorzystywane w pracy oraz opisał cel i zakres rozprawy.

W Rozdziale 2 przedstawiono równania i metody obliczeniowe wykorzystane w pracy. W szczególności, implementację metod kolokacji w połączeniu z metodą Kansy do rozwiązywania zagadnienia brzegowego i brzegowo-początkowego. Ważnym elementem tego rozdziału jest omówienie algorytmów znajdowania właściwej wartości parametru kształtu (parametr ϵ) w postaci wykorzystywanych bazowych funkcji radialnych.

Rozdziały 3 i 4 stanowią zasadniczą część pracy. W Rozdziale 3 przeprowadzono analizę numeryczną i ocenę, czy zaproponowana metoda i algorytm doboru parametru kształtu są właściwe, a ich implementacja prawidłowa. W tym celu wykorzystano jako benchmarki dostępne rozwiązania analityczne oraz rozwiązania otrzymane innymi metodami. W kolejnym rozdziale rozważano zagadnienie optymalizacyjne dotyczące projektowania urządzenia termicznego, o zmieniających się parametrach termofizycznych, posiadającego pożądane własności. Rozważano kilka typów urządzeń dla różnych wariantów sterowania strumieniem ciepła (inwersja, koncentracja, ekranowanie, maskowanie).

Rozdział 5 zawiera ogólne wnioski z przeprowadzonych badań i prezentuje interesujące perspektywy dalszego rozwoju metody.

Spis literatury stanowi 180 pozycji. Doktorant jest współautorem 7 pozycji.

Znajdujący się na końcu Dodatek zawiera krótki opis jednej ze stosowanych przez doktoranta metod referencyjnych: metody różnic skończonych. Przedstawiony opis dotyczy dwuwymiarowego hiperbolicznego równania Cattaneo-Vernotte'a, będącego najbardziej ogólnym przypadkiem, obejmującym pozostałe analizowane równania, jako przypadki szczególne.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Oceniana rozprawa poświęcona jest modelowaniu pól termicznych w ośrodkach niejednorodnych, które charakteryzują się zmiennością przestrzenną parametrów termofizycznych. Analizowano jedno- i dwuwymiarowe obszary regularne i nieregularne przy różnych warunkach brzegowych (Dirichleta, Newmana, Robina). W celu znalezienia

przybliżonego rozwiązania zagadnienia brzegowego i brzegowo-początkowego przepływu ciepła Doktorant sformułował, a następnie zaimplementował w środowisku obliczeniowym MATLAB metody kolokacyjne oparte na klasycznej bezsiatkowej, niesymetrycznej metodzie Kansy. Do aproksymacji rozwiązania zostały wykorzystane radialne funkcje bazowe typu wielokwadrak.

W szczególności, w pracy rozważano równania różniczkowe cząstkowe: Laplace'a (zagadnienia ustalonego, bezźródłowego przepływu ciepła), paraboliczne (beźródłowy przepływ ciepła dla równań konstytutywnych w postaci prawa Fouriera) oraz hiperboliczne (równania Cattaneo-Vermotte'a z opóźnieniem). W klasycznej metodzie Kansy (dyskretyzacja przestrzeni) zastosowano warianty współczynnikiowy, a także pseudospektralny, a następnie zaimplementowano klasyczne metody całkowania numerycznego równań dynamiki, jak np. niejawną metodą Eulera, czy Houbolta. Oprócz podejścia klasycznego, dla obydwu wariantów zastosowano podejście czasoprzestrzenne. Dla wszystkich wykorzystywanych sformułowań pokazano implementację warunków brzegowych i przeprowadzono analizę numeryczną, dotyczącą wpływu kluczowych parametrów na efektywność proponowanych metod. Analizowano zmienność i) geometrii: liczba i gęstość punktów kolokacji, ii) przestrzennych parametrów termofizycznych oraz iii) parametru ε dla radialnych funkcji bazowych typu wielokwadrak. Ten ostatni parametr ma szczególny wpływ na dokładność rozwiązania i w pracy zaproponowano modyfikację dotychczas stosowanych algorytmów jego doboru (np. dla metody Fasshauera) oraz, co należy szczególnie podkreślić, autorski algorytm wyznaczania optymalnego ε , oparty o własności wskaźnika uwarunkowania macierzy układu, otrzymanego po zastosowaniu dyskretyzacji.

W celu weryfikacji i walidacji zaimplementowanych metod i algorytmów wykorzystano dostępne rozwiązania analityczne lub rozwiązania otrzymane innymi metodami, takimi jak metoda różnic skończonych czy metoda elementów skończonych.

Opracowane metody zostały wykorzystane w ostatniej części pracy (Rozdział 4) do optymalnego projektowania urządzeń termicznych o pożądanym własnościach. Rozważano problem ustalonego przepływu ciepła w obszarze dwuwymiarowym, w którego wnętrzu wyróżniono podobszar zajmowany przez urządzenie termiczne, dzięki któremu można sterować przepływem ciepła w podobszarze jednorodnym, ograniczonym przez to urządzenie. Rozważano zagadnienia sterowania strumieniem ciepła za pomocą takiego urządzenia w postaci: maskowania, ekranowania, koncentracji i inwersji. Rozwiązano zagadnienie minimalizacji funkcjonału wyrażającego błąd średniokwadratowy strumienia ciepła w podobszarze wewnątrz urządzenia termicznego, w porównaniu z założonym rozkładem strumienia ciepła. Jako zmienne projektowe, wybrano wartości przewodności cieplnej (sztuczna gęstość) w podobszarze zajmowanym przez urządzenie (metamateriał), co prowadzi do modeli ośrodków lokalnie izotropowych. Ze względu na znaczny rozmiar wektora zmiennych projektowych, gradient funkcji celu wyznaczono analitycznie stosując metodę Lagrange'a dla ekstremum warunkowego oraz metodę układu sprzężonego. Pozwoliło to wyeliminować pewne kosztowne obliczeniowo składowe wektora gradientu funkcji celu. W celu zapewnienia stabilności procesu optymalizacji zastosowano podwójną filtrację: i) wektora zmiennych projektowych oraz ii) wektora gradientu. Badano również wpływ

gęstości punktów kolokacji, zastosowanych parametrów filtrów oraz punktu startowego algorytmu optymalizacji na wartość funkcji celu i otrzymane wyniki. Wszystkie sformułowane metody i algorytmy zostały zaimplementowane przez Doktoranta w środowisku obliczeniowym MATLAB.

W bibliografii znajduje się 7 współautorskich publikacji naukowych, które powstały w wyniku realizacji rozprawy doktorskiej. Rezultaty opublikowano w renomowanych czasopismach (Materials – JCR IF=3.748, International Journal of Heat and Mass Transfer- JCR IF=5.431) oraz w materiałach konferencji międzynarodowych.

4. Uwagi dyskusyjne

1. W rozprawie Doktorant nie zdefiniował pojęcia metamateriałów termicznych, jaki jest ich związek z tworzywami gradientowymi (ang. functionally graded materials), czy ze strukturami blokowymi (ang. piece-wise homogeneous regions).
2. W równaniach rozważanych przez autora występuje operator Laplace'a (jako wiodący z najwyższymi pochodnymi). Rozsądnie byłoby zatem zastosować bazowe funkcje radialne tak aby wykorzystać ten fakt obliczeniowo. Mianowicie, zamiast metody Kansa zastosować funkcje radialne w metodzie DR (dual reciprocity) i wykorzystać pseudotemperaturę do aproksymacji pozostałych członów. Chociaż użycie DR jest bardziej "wymagające" analitycznie niż metoda Kansa, to jej wykorzystanie znacznie zwiększyłoby dokładność przy niższym koszcie obliczeniowym. Polecałabym autorowi uwzględnienie tej opcji przy prowadzeniu przyszłych prac badawczych.
3. Przeprowadzone symulacje numeryczne pokazują, że parametr ϵ ściśle zależy od analizowanego problemu. Dobór tego parametru jest kluczowy, aby uniknąć z jednej strony wzrostu niedokładności rozwiązania dla zbyt małej wartości ϵ , a z drugiej strony braku stabilności dla zbyt dużej wartości ϵ . Czy przy pomocy zaprezentowanych algorytmów można przedstawić rekomendacje dotyczące „optymalnego przedziału” dla wartości ϵ ?
4. W podejściu czasoprzestrzennym (Rozdział 2.3) występuje parametr β . Wskazany byłby pełniejszy komentarz dotyczący interpretacji tego parametru lub dodatkowe referencje.
5. W pracach naukowych do celów referencyjnych warto, oprócz wykresów i grafik, zaprezentować część otrzymanych wyników w postaci liczbowej np. w tabelarycznej, aby przedstawić czytelnikowi dane z dokładnością do kilku cyfr znaczących (Helsing, J., Jonsson, A.: "On the accuracy of benchmarks tables and graphical results in the applied mechanics literature", *ASME J. Appl. Mech.* 69, 88–90 (2002)).
6. Czasami język rozprawy jest zbyt „popularno-naukowy”.

5. Wnioski końcowe

Rozprawa doktorska mgra inż. Olafa Popczyka jest interesującym studium z zakresu zastosowania różnych wariantów metody Kansa do modelowania procesów termicznych w ośrodkach niejednorodnych i stanowi istotny wkład w modelowanie i projektowanie materiałów, pozwalających na sterowanie przepływem ciepła.

Przedstawiona rozprawa potwierdza, że Doktorant posiada ogólną wiedzę w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna* i jest przygotowany do prowadzenia samodzielnych badań w zakresie mechaniki obliczeniowej.

Mając powyższe na uwadze, stwierdzam, że:

1. Rozprawa "Modelling of thermal fields in metamaterials using radial basis function-based meshless methods" spełnia wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) art. 13 ust 1.
2. Cel i zakres pracy oraz zastosowane metody i otrzymane wyniki kwalifikują ją do dyscypliny naukowej *inżynieria mechaniczna* według nowej klasyfikacji dziedzin i dyscyplin określonej w rozporządzeniu z dnia 20 września 2018 r. (Dz.U. 2018, poz. 1818)

i wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony.

Rikaine Rykante - Keesule